

METHOD AND APPARATUS FOR GENERATION OF HIGH-RESOLUTION IMAGE FROM SERIES OF LOW-RESOLUTION IMAGES

Publication number: JP8263639

Publication date: 1996-10-11

Inventor: ANDORIYUU JIEI PATSUTEI; EMU IBURAHIMU SEZAN

Applicant: EASTMAN KODAK CO

Classification:

- International: H04N1/387; G06T1/00; G06T3/40; G06T5/50; G06T13/00; H04N5/14; H04N7/01; H04N7/26; H04N1/387; G06T1/00; G06T3/40; G06T5/50; G06T13/00; H04N5/14; H04N7/01; H04N7/26; (IPC1-7): G06T1/00; G06T13/00; H04N1/387

- European: G06T3/40; G06T5/50; H04N5/14; H04N7/01D4; H04N7/01H; H04N7/26J6B

Application number: JP19960050540 19960307

Priority number(s): US19950401396 19950309

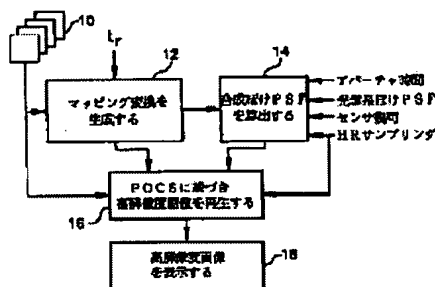
Also published as:

EP0731600 (A2)
US5696848 (A1)
EP0731600 (A3)
EP0731600 (B1)

Report a data error here

Abstract of JP8263639

PROBLEM TO BE SOLVED: To reduce the influence of aliasing, fogs and noise, etc., in the reproduction of pictures and to provide high resolution pictures. **SOLUTION:** In this device for generating the high resolution pictures from a series of low resolution motion pictures, the mapping conversion of the respective low resolution pictures 10 is generated 12. By the mapping conversion, the picture elements of the respective low resolution pictures are mapped to the positions of the high resolution pictures. By using the mapping conversion, for the respective picture elements of the respective low resolution pictures, a synthesized point spreading function (PSF) is calculated 14. By using the calculated synthesized PSF, by projection to a projection set (POCS), the high resolution pictures are generated from the low resolution pictures 16.



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平8-263639

(43) 公開日 平成8年(1996)10月11日

(51) Int.Cl. ⁸	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
G 0 6 T 1/00			G 0 6 F 15/62	4 2 0 A
13/00			H 0 4 N 1/387	1 0 1
H 0 4 N 1/387	1 0 1		G 0 6 F 15/62	3 4 0 D

審査請求 未請求 請求項の数6 O L (全 17 頁)

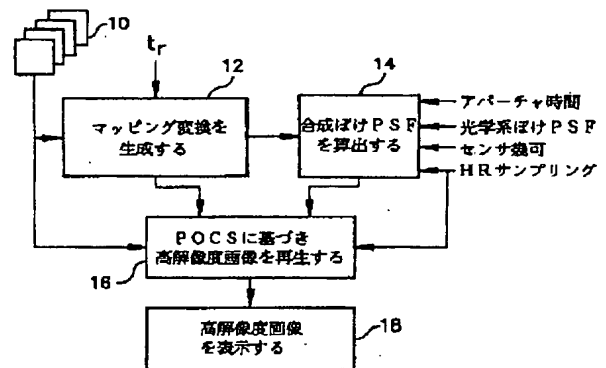
(21) 出願番号	特願平8-50540	(71) 出願人	591264544 イーストマン・コダック・カンパニー アメリカ合衆国、ニュー・ヨーク・14650、 ロチェスター、ステイト・ストリート・ 343
(22) 出願日	平成8年(1996)3月7日	(72) 発明者	アンドリュウ ジェイ バッティ アメリカ合衆国 ニューヨーク州 ロチェ スター クリッテンデン ウェイ 298
(31) 優先権主張番号	4 0 1 3 9 6	(72) 発明者	エム イブラヒム セザン アメリカ合衆国 ニューヨーク州 ロチェ スター アービング ロード 71
(32) 優先日	1995年3月9日	(74) 代理人	弁理士 吉田 研二 (外2名)
(33) 優先権主張国	米国 (US)		

(54) 【発明の名称】 一連の低解像度画像から高解像度画像を生成する方法及び装置

(57) 【要約】

【課題】 画像の再生において、エイリアシング、ぼけ、ノイズなどの影響を完全に解決するのが困難である。

【解決手段】 一連の低解像度モーション画像から高解像度画像を生成する装置において、各低解像度画像のマッピング変換が生成される(12)。このマッピング変換により、各低解像度画像の画素が高解像度画像の位置にマップされる。このマッピング変換を用いて、各低解像度画像の各画素に対し、合成された点拡がり関数(P S F)が算出される(14)。算出された合成P S Fを用いて、凸集合(P O C S)への射影により、低解像度画像から高解像度画像が生成される(16)。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 一連の低解像度モーション画像から高解像度画像を生成する方法であり、以下のステップを含む。

- a. 各低解像度画像のマッピング変換を生成し、各低解像度画像の画素を高解像度画像の位置にマップするステップと、
- b. 前記マッピング変換を用いて、各低解像度画像の各画素に対する、合成された点拡がり関数 (PSF) を算出するステップと、
- c. 前記合成ぼけ PSF を用いて、凸集合への射影 (POCS) により、低解像度画像から高解像度画像を生成するステップと、
- d. 前記高解像度画像を表示するステップ。

【請求項 2】 請求項 1 に記載の方法において、マッピング変換を生成するステップは、以下のステップを含む。

- a. 低解像度画像の 1 つを基準画像として選択するステップと、
- b. 各画素における、前記基準低解像度画像とそれ以外の各低解像度画像との間の相対運動を説明するマッピング変換を推定するステップと、
- c. 基準画像以外の各低解像度画像の画素に対して、推定されたマッピング変換の妥当性をテストし、有効なマッピング変換を示すステップと、
- d. 低解像度画像から高解像度画像への有効なマッピング変換のそれぞれを定めるステップ。

【請求項 3】 請求項 1 に記載の方法において、前記合成 PSF を算出するステップは、以下のステップを含む。

- a. 前記マッピング変換を用いて、各低解像度画像の各画素に対し、高解像度画像に関する有効サンプリングアパーチャを計算するステップと、
- b. 前記有効サンプリングアパーチャの PSF を計算するステップと、
- c. 光学 PSF を決定するステップと、
- d. 各画素の計算された PSF を光学的 PSF と合成し、各画素についての合成された PSF を生成するステップ。

【請求項 4】 請求項 1 に記載の方法において、POCS によって高解像度画像を生成する前記ステップはさらに以下のステップを含む。

- a. 低解像度画像の 1 つを、高解像度画像の多数の画素に内挿して、高解像度画像の推定値を生成するステップと、
- b. 有効なマッピング変換を有する低解像度画像のそれぞれにおける各画素に対し、前記高解像度画像の推定値を以下の方法により改良するステップ、(1) 低解像度画像の 1 つにおける 1 画素を選択し、(2) 前記選択された画素の合成 PSF を、高解像度画像の現在の推定値

に供給することにより、高解像度画像から計算された画素値を生成し、(3) 前記選択された画素値と計算された画素値との差を求め、その差の大きさが所定の閾値より大きい場合にはその誤差を高解像度画像の現在の推定値に逆射影 (back project) する、

- c. 高解像度画像の前記改良された推定値を、許容可能な範囲にクリップするステップと、
- d. 上記第 2 のステップと第 3 のステップを、停止基準が満たされるまで繰り返すステップ。

10 【請求項 5】 一連の低解像度ビデオイメージから高解像度ビデオシーケンスを生成する方法であり、請求項 1 に記載の方法を前記一連の低解像度ビデオイメージに複数回適用して、高解像度画像のビデオシーケンスを生成する方法。

【請求項 6】 一連の低解像度モーション画像から高解像度画像を生成する装置であり、以下を含む。

- a. 一連の低解像度モーション画像を生成する原画生成手段 (source)、
- b. 前記一連の低解像度画像を受信し、高解像度画像を生成する画像生成装置であり、(1) 各低解像度画像に対するマッピング変換を生成し、各低解像度画像の画素を高解像度画像の位置にマップする手段、(2) 前記マッピング変換を用いて、各低解像度画像の各画素に対して合成された点拡がり関数 (PSF) を算出する手段、(3) 前記ぼけ PSF を用いて、凸集合への射影 (POCS) により、低解像度画像から高解像度画像を生成する手段と、を含む画像生成装置、及び
- c. 前記高解像度画像を表示する表示装置。

【発明の詳細な説明】

30 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、デジタル画像処理に関する。より詳細には、ぼけ (blur) やノイズの問題を有し、任意の格子 (arbitrary lattice) 上にアンダーサンプリングされた (under-sampled) 一連のモーション画像 (motion image) から高解像度スチル画像 (still image) を得る技術に関する。

【0002】

【従来の技術】本発明は、任意の時空間格子上にアンダーサンプリングされ、ぼけやノイズによる質の劣化が見られる複数のモーション画像 (すなわち相対変位を含む複数の画像) から高解像度のスチル画像を再生する方法及び装置に関するものである。前記複数の低解像度劣化モーション画像は、時間的に連続して動作する電子スチルカメラによって得られた特定シーンに関する一連のスチル画像でもよいし、ビデオ信号からデジタル化されたフレームでもよい。

【0003】上記のような低解像度画像は、通常、散在する空間格子 (すなわち、サンプリング格子) 上にアンダーサンプリングされている。これは、散在するポイントの集合上でカラーチャネルをサンプリングするカラー

フィルタアレイが存在すること、及びインターレース、あるいはこれらのいずれかに起因する。さらには、このような画像にはぼけ及びノイズの問題がある。ぼけの原因としては、以下に述べる事項のすべてあるいはそのいずれかが考えられる。すなわち、センサ積分 (sensor integration)、シーンとカメラの相対運動、ノンゼロアパーチャ時間、及び焦点のぼけたレンズである。一方、撮像センサ、及びデジタル化処理と量子化処理がノイズを発生させる。ここでは、これらの欠陥を1つでも有する画像を低分解能画像と称することにする。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】複数の低解像度画像が供給される場合、例えば良質のハードコピープリントを生成するなどの多様な目的のために、より高品質のスチル画像の生成がしばしば望まれる。生成されたスチル画像は、好ましくは入力された画像の格子より密である標準矩形格子上に、多数のサンプルを有することにより、エイリアシングの影響を低減し、さらにぼけやノイズの問題を排除したものでなければならない。

【0005】米国特許第5,341,174号(クー他)には、次のような画像生成方法が開示されている。すなわち、相対運動情報に基づいて、隣接画像からのサンプルを選択された画像にマッピング(写像)することにより画像が形成され、その画像のサンプル数及びサンプル密度が高められる。ところが、この特許に開示されているアプローチは、インターレース(飛び越し走査)されたビデオにその適用が限定され、ぼけやノイズによる劣化を考慮していない。したがって、ぼけやノイズによって劣化したデータは、その状態で用いられてしまう。

【0006】センサにおける積分によって生じるぼけについては、以下の方法でスチル画像を生成することで考慮がなされている。すなわち、「画像強調のためのモーション分析: 解像、閉鎖 (occlusion)、及び透明度

(M. Irani S. Peleg, J. of Visual Comm. and Image Representation, vol. 4, pp. 324-335, 1993年12月); 「仮想ペローズ: ビデオからの高品質スチル画像の編成」(IEEE Int. Conf. Image Proc., (Austin, TX), 1994年11月); 「画像登録による解像度の向上」

(M. Irani S. Peleg, Graphical Models and Image Processing, vol. 53, pp. 231-239, 1991年5月)に記載の方法である。しかしながら、上記の方法は、アパーチャ時間を考慮に入れておらず、運動ぼけ (motion blur) を適切に扱っていない。さらに、上記の方法は、ノイズによる劣化をモデルせず、これを考慮していない。この結果、これらの方法を用いて生成されたスチル画像には、依然として運動ぼけ及びノイズによる劣化の問題が残されている。さらに、これらの方法では、入力される低解像度画像は標準の矩形格子上にサンプルされていると仮定されている。従って、例えば入力画像がイ

ンターレースされたビデオから得たものである場合には、これらの画像は、上記の方法を適用するに先立ち、まずデインターレース(すなわち、標準矩形格子上にサンプリングされたプログレッシブ画像に変換)しなければならない。このような工程を行わない限り、上記方法は、インターレースされてない、プログレッシブな入力画像に限定されることになる。

【0007】A. M. テカルプ他による「低解像度画像シーケンスからの高解像度画像再生、及び空間変化 (space-varying) 画像復元」(IEEE Int. Conf. Acoust. t., Speech, and Signal Proc., (San Francisco, CA), vol. III PP. 169-172, 1992年3月)において説明される高解像度画像の再生方法では、凸集合への射影(POCS)に基づく方法が用いられている。この方法は、センサ積分によるぼけ、及びノイズに対して考慮している。しかしながら、この方法は運動ぼけに対する考慮がなく、さらに、インターレースされていないプログレッシブな入力画像にその適用が限定されている。

【0008】

【課題を解決するための手段】本発明の目的の1つは、高品質のスチル画像を生成する際に問題となる前記の課題のすべてに対処する方法を提供することである。すなわち、エイリアシング(任意の格子上の空間アンダーサンプリングによる)、センサのぼけ(センサにおける空間積分、及びシーンとセンサの相対運動がある場合のアパーチャ時間における時間積分による)、光学系ぼけ(焦点のぼけたレンズによる)、及びノイズ(センサ及び量子化のノイズ)の問題である。

【0009】本発明の別の目的は、同時モデリングの問題、及びエイリアシング、センサ積分によるぼけ、光学系ぼけ、運動ぼけ、ノイズによる汚染の影響を完全に解決することにある。このように、本発明によれば、高解像度のスチル画像またはシーケンス(連続画面)を生成することができる。

【0010】本発明の更なる目的は、任意のサンプリング格子上にサンプリングされた低解像度画像から高解像度画像を再生することにある。これは、サンプリング密度を高めることでエイリアシングの影響を低減し、さらに、センサ積分によるぼけの影響、及びノイズ汚染の影響を低減することにより達成される。

【0011】本発明の更なる目的は、サンプリング密度を高めることでエイリアシングの影響を低減し、さらに、センサ積分によるぼけの影響を低減することによって、任意のサンプリング格子上にサンプリングされた低解像度画像から高解像度画像を再生することにある。

【0012】本発明の別の目的は、高解像度モードを備えたデジタルスチルイメージカメラにおいて用いることのできる方法を提供することにある。前記高解像度モードは、「バースト」方式を呼び出すことにより動作する。すなわち、相対運動する連続画像が急速に取り込ま

5

れ、これらの画像が、インカメラハードウェアあるいはオフラインソフトウェア／ハードウェア処理能力のいずれかをを用いた方法によって処理される。こうして、高解像度のスチル画像が生成される。あるいは、相対運動を含む連続画像を、通常の電子スチルカメラを用いて取り込むこともできる。本発明の別の目的は、ビデオカメラによって捕獲された画像を処理するために用いることのできる方法を提供することにある。本発明により、インカメラハードウェアあるいはオフラインソフトウェア／ハードウェア処理能力のいずれかをを用いて、画像を処理し、高分解のスチル画像を生成することができる。生成された高解像度画像は、カラーフィルタレイ（CFA）に固有の密度より高密度で空間的にサンプリングされ、さらにインターレースされていない。このようなカメラは、例えば、原稿、図面、及び写真の極めて解像度が高いスチル画像の送信が望まれるようなデスクトップビデオ会議システムにおいて有用である。

【0013】上記目的は、本発明により、一連の低解像度モーション画像から高解像度の画像を生成するシステムを供給することによって達成される。前記システムは、低解像度画像のそれぞれに対するマッピング変換を生成し、各低解像度画像の画素を高解像度画像の位置にマップする。このマッピング変換を用いて、合成（combined）点拡がり関数（PSF）が、各低解像度画像の各画素に対して算出される。さらに、合成PSFを用いて、凸集合への射影（POCS）（projection onto convex sets）により、低解像度画像から高解像度画像が生成される。

【0014】本発明は、以下のような効果を有する。入力画像が標準矩形格子上にサンプリングされていない場合には、前処理として、入力を標準矩形格子上で内挿処理しなければならないが、本発明ではこのような前処理を行わなくとも、任意の格子上にサンプリングされている画像を処理することができる。本発明は、凸集合への射影（POCS）に基づく方法を用いて、ぼけ、ノイズ、任意の格子上にサンプリングされた画像の問題を同時に扱う、画像再生方法を展開させている。さらに、本発明は、運動推定（motion estimates）を柔軟に扱うことができる。以下に述べるように、本発明は、運動推定の正確性に適応することができる高解像度画像再生を可能にするものである。

【0015】

【発明の実施の形態】本発明の主要なステップが、図1のフローチャートに示されている。図において、複数の低解像度モーション画像10が、本発明による画像処理方法の入力として示されている。これらの入力低解像度画像の組から、1つの入力画像がユーザによって選択される。選択された画像は基準画像と呼ばれ、この画像を高解像度化したものが再生される。基準画像は、その時係数 t_r によって特定されている。

6

【0016】本発明は、3つの主要な処理ステップを有する。図1に基づき説明する。第1の処理ステップ12では、各低解像度入力画像の画素を、高解像度画像の位置にマップするマッピング変換が供給される。マッピング変換を生成するために、低解像度基準画像に対し、その他の低解像度画像のそれぞれの各画素の運動ベクトル場が推定される。ここで、分数画素精度（fractional pixel accuracy）を有する周知の階層型ブロックマッチング方法などの、運動推定方法を用いることができる。あるいは、米国特許第5,241,608号（1993年8月31日発行、発明者：フォーゲル）に開示されている運動推定方法を用いて、運動ベクトル場を推定することもできる。前記ブロックマッチング方法は、局所移動運動モデル（locally translational motion model）に基づいている。または、以下に説明するように、アフィン運動モデルを用いてもよい。アフィン運動モデルは、ある領域内において、移動に加え、ズーム、回転及びせん断（shear）をモデルするものである。

【0017】第2の処理ステップ14では、前のステップ12において生成されたマッピング変換情報と、アパーチャ時間、センサ幾何（geometry）、光学系ぼけ点拡がり関数（PSF）、及び高解像度サンプリング幾何（HR）を用いて、合成ぼけPSFが算出される。これは、運動ぼけと光学系ぼけ、及びセンサにおける積分によるぼけに対処するものである。合成ぼけPSFの計算は、像形成モデル（image formation model）に基づいて行われるが、これについては後に説明する。

【0018】第3のステップ16において、高解像度画像が生成される。このステップでは、合成ぼけPSF、マッピング変換からの運動情報、及び供給された低解像度画像10が、POCSに基づく方法で用いられる。この方法については、「凸射影理論の概観及び画像回復問題へのその応用」（M. I. セザン著、「超顕微法」、1992年発行第40号、55-67ページ）の論文に詳細に説明されている。このステップで再生された高解像度画像は、前記基準画像を高解像度化した推定であり、入力された低解像度画像のサンプリング格子パターンに関わらず、より緻密で、標準矩形のサンプリング幾何上に多数のサンプルを有し、ぼけやノイズによる画質の劣化の問題を排除したものである。つづいて、ステップ18において、生成された高解像度画像は、CRTまたはプリンタなどのディスプレイ装置に表示される。

【0019】低解像度画像は、異なる時点で異なるサンプリングパターンによってサンプリングされることもある。このような場合には、サンプリング格子は、サンプリングパターンにおいて周期的な変化を示す。低解像度の一般的なサンプリング格子パターン、及び高解像度画像が図2に示される。パターン（a）はダイアモンド型の格子を、パターン（c）はインターレースされた格子を示している。パターン（b）及び（d）は、高解像度

画像が再生されたより高密度の格子を示している。図において、白抜きのは丸は高解像度再生プロセスによって生成された新たなサンプルを示し、黒塗りの丸は低解像度画像のサンプリングパターンを示している。図 2 は有効サンプリング密度の 2 倍の増加を示しているが、本発明は、必要に応じて、より高い増加率を提供することができる。また、低解像度画像の 1 つではなく、すべてを連続的に処理することにより、連続した高解像度画像を生成することができる。この際、その都度、画像の 1 つが基準画像とされる。このような処理は、例えば高解像度ビデオの生成に有用である。

【0020】図 3 には、本発明の実施に役立つ装置が示されている。ディジタイザ 22 に接続されたビデオカムコーダ/VCR 20、デジタルスチルカメラ 24、デジタルビデオカムコーダ 26、デジタルスキャナ 28、またはディスクストレージ 30、などの入力装置が、連続するデジタルモーション画像の供給源となる。連続デジタルモーション画像は、画像処理コンピュータ装置 32 に供給される。画像処理コンピュータ装置 32 は、パワー PC などのコンピュータ 34、一般的に SVGA またはそれ以上の解像度を有する CRT ディスプレイ 36、及びキーボード 38 またはマウスなどのオペレータ入力を含む。コンピュータ 34 は、高解像度画像のハードコピーディスプレイを生成するプリンタ 40 などの出力装置、画像の継続中の最終表示を記憶する光ディスクなどの記録媒体 42、または遠隔ディスプレイに高解像度画像を分配する通信ネットワーク 44 に接続するリンクなどに接続される。

【0021】複数の低解像度画像がコンピュータ装置 32 に供給されて CRT 36 に表示されると、ユーザは、対話方式で、基準画像の対象領域を特定し、解像度の改良処理をその領域に限定することができる。図 4 は、一連の低解像度画像 46、48、50 を示している。ここでは、画像 48 の対象領域 52 が、高解像度処理に指定されている。この場合、選択された領域を高解像度化したものは、高解像度サンプリング幾何上に再生され、その結果が低解像度画像の格子上にダウンサンプリングされ、前記対象領域において、元の画素値と置き換えられる。図 4 の絵では、人の顔が対象領域 52 を形成している。この場合、結果として得られた画像では、高解像度で顔の詳細を見ることができる。また、ユーザは選択された対象領域 52 に対応する領域を視覚的に認定することもできる。この場合、低解像度画像全体ではなく、これらの認定領域だけが処理されるので、コンピュータ操

作における節約となる。

【0022】A. マッピング変換

低解像度画像のそれぞれから基準画像に対する運動が推定され、この結果、M 個の低解像度画像に対して、(M-1) 個の運動ベクトル場が得られ、これによりマッピング変換が生成される。マッピング変換は、低解像度画像の画素を、高解像度画像のサンプリング位置にマップするためのものである。これについては、図 5 において示されている。最も簡単なケースとしては、低解像度画像 46 から基準画像 48 までの運動を、空間的均一移動としてモデルすることができる。しかしながら、実際には、このモデルは最適ではないことが判明した。そこで、不均一な移動運動を推定するための、階層的ブロックマッチング方法、及びアフィンモデル及び推定量に基づく方法が、運動ベクトル場の推定に、より効果的に用いられている。

【0023】低解像度画像 46、48、50、53 は、すでに矩形格子上に得られない限りは、運動推定のために、まず、矩形の低解像度の格子上に双線形に内挿される。例として、ダイヤモンド形の低解像度入力格子 54、及びこれに対応する低解像度の矩形格子 56 が図 6 に示されている。基準画像の内挿された値は運動推定のためにのみ用いられ、その後は破棄され、POCS に基づく高解像度再生処理においてはその推定値に置き換えられる。運動ベクトルは、低解像度画像のそれぞれの実際の画素に対して推定され、その結果、(M-1) 個の運動ベクトル場推定値が得られる。

【0024】ブロックマッチング方法の場合、その運動は、局所的移動 (locally translational) であると仮定される。他の変換効果が小さい場合には、このような近似 (approximateion) が大変効果的となる。M. ピアリングによる「階層的ブロックマッチングによる変位推定」(Proc. SPIE Visual Communications and Image Processing '88, pp. 942-951, 1988) に記載の階層的ブロックマッチング方法 (HBM) を用いて、不均一の運動場が推定される。ここで用いられているマッチング基準は、測定ブロック間の平均絶対差 (MAD) である。階層の各レベルにおいて、対数型のサーチが用いられる。

【0025】5 レベルの HBM を実施するのに用いることのできる好適なパラメータ値が表 1 に示されている。ここで、一番左の列に示されているのが階層レベル数であり、レベル 1 が最も低い解像度レベルを示している。

【0026】

【表 1】

レベル	最大変位		ウィンドウ サイズ		フィルタ サイズ		ステップ サイズ	SSF	精度
	横	縦	横	縦	横	縦			
1	31	31	128	128	10	10	32	8	1
2	15	15	64	64	10	10	16	8	1
3	7	7	64	64	5	5	8	4	1
4	3	3	28	28	5	5	4	4	1
5	1	1	12	12	3	3	3	2	0.25

水平方向／垂直方向最大変位は、対数型サーチの第1ステップにおいて用いられる変位である。水平方向／垂直方向測定ウィンドウサイズは、MADが計算されるウィンドウのサイズである。フィルタの水平方向／垂直方向のサイズは、ガウスフィルタのサポートを特定するもので、分散 (variance) はサポートサイズの2分の1に設定されている。ステップサイズは、運動推定が算出される基準画像の隣接する画素間の水平方向及び垂直方向の距離である。サブサンプリング係数 (SSF) は、測定ウィンドウ上のMADを算出する場合に用いられる水平方向及び垂直方向のサブサンプリングである。推定の精度は、低解像度の矩形格子のサンプリング期間に関するものである。なお、これらパラメータのすべての単位 *

10 * は、低解像度の矩形格子の空間サンプリング期間に関連するものである。(すなわち、低解像度矩形格子に対する、画素精度0.25の改善は、HBMの最終レベルにおいて行われている。)

(回転、せん断(シア)、及びズームによって起こる)有効な非移動マッピング変換は、上述のブロックマッチング技術を用いて正確にモデルすることができない。この場合は、下式のパラメータ $c_1 - c_6$ によって決定されるグローバルアフィン変換を用いることにより、このようなマッピング変換を生じさせる画像間運動 (inter-image motion) をモデルするのが好ましい。

【0027】

【数1】

$$g(x_1 + c_1 + c_2 x_1 + c_3 x_2, x_2 + c_4 + c_5 x_1 + c_6 x_2, t) = g(x_1, x_2, t_r) \quad (1)$$

これらのパラメータ c_1 、 c_2 、 c_6 を推定するために用いることのできる技術については、J. バーゲン、P. パート、R. ヒンゴラーニ、S. ペレグによる、「2成分画像運動を推定するための3フレーム対数」

(IEEE Trans. Pattern Anal. Intel., vol. 14, pp. 886-896, 1992年9月発行)に説明がある。この推定方法では、空間的及び時間的な導関数 (derivatives) を推定する必要がある。空間導関数は、各画素を中心とした 5×5 のウィンドウに適合する (fit) 2-D 2次多項式最小二乗法を用いて推定される。時間導関数は、各画素における2点有限前進差分 (2-point finite forward difference) を用いて算出される。これらの導関数を推定するに先立ち、 11×11 の画素均一ぼけ (pixel uniform blur) を用いて画像をぼけさせ、ノイズの影響を低減する。

【0028】カラーイメージの場合には、輝度ドメインにおいて運動が推定される。さらに、その運動情報を用いて、供給された低解像度画像の原色チャネル (例えば、赤、緑、青) がそれぞれ処理される。したがって、マッピング変換を形成するための運動推定に先立ち、RGBから輝度及び2つの色票 (例えば、YUV) への変換が、低解像度画像に提供される。

【0029】B. 合成PSFのモデリング及び計算

合成PSFの計算は、像形成ぼけモデルに基づく。以下においては、まず、このモデルについて説明する。このモデルを用いて合成PSFが算出される。

【0030】まず、入力された低解像度画像を、特定の基準時間 t_r において、連続線形シフト変数 (LSV) ぼけ関係によって、実際の高解像度画像に関連づけるモデルについて説明する。この目的のため、まず、像形成モデルについて説明する。この形成モデルに前述のマッピング変換を組み入れることにより、所望のLSV関係が合成ぼけPSFによって表わされる。次に、離散化 (discretization) についての説明が示される。これにより、離散化された高解像度画像が、対応する離散的LSV関係によって、観測された低解像度画像に関連づけられる。そして、これが離散的合成ぼけPSFで表される。最後に、次の高解像度画像再生ステップに用いられる合成PSFを算出する実際的な方法が供給される。

【0031】像形成モデル

本発明において用いられる像形成モデルが図7に示されている。図において、入力信号 $f(x_1, x_2, t)$ は、連続ドメインにおける実際の高解像度イメージを示している。この高解像度イメージが離散的推定を求めるべき画像である。低解像度センサの物理的サイズの影響、すなわちセンサ領域上の積分によるぼけ、及び光学系装置のぼけが、図7の第1段60においてモデルされる。高解像度画像 $f(x_1, x_2, t)$ は、センサの形状を表す核 $h_a(x_1, x_2, t)$ と光学的ぼけ核 $h_o(x_1, x_2, t)$ の双方と合成される。これらはほとんどに時間の関数であるが、ここでは、これらをアパーチャ時間において一定であると限定する。こうして、光学的

11

ぼけとアパーチャサイズを、画像ごとに変化させることができる。

【0032】アパーチャ時間の影響は、時間ドメイン積分器 (time-domain integrator) によって、図7の第2段62においてモデリングされている。その出力は、以下の式によって表される。

【0033】

【数2】

$$g_2(x_1, x_2, t) = \frac{1}{T_a} \int_{t-T_a}^t g_1(x_1, x_2, \tau) d\tau, \quad (2)$$

ここで、 T_a は、センサアパーチャ時間を示している。

なお、ここで、最初の2つの段60と62は、交換が可*

$$g_2(m_1, m_2, k) = g_2(x_1, x_2, t) \Big|_{[x_1, x_2, t]^T = V_2 [m_1, m_2, k]^T} \quad (3)$$

ここで、 V_2 はサンプリング格子を特定する行列を示し、 t は転置作用を示している。最終的なモデリングステップ66において、低解像度センサによる付加的なノイズがサンプルされたビデオ信号に付加される。

【0036】運動を含むモデル

次に、前記像形成モデルに運動モデルを組み込んで、固定された任意の時間段階 t_r における、低解像度画像と所望の高解像度画像との望ましい LSV 関係を確立する。この t_r を適当に設定することによって、単一の高解像度スチル画像、または、連続する高解像度画像からなる高解像度ビデオ画像を再生することができる。

【0037】運動モデルが像形成モデルに供給されると、図7の最初の2つの段60及び62を組み合わせ、単一の LSV 関係を形成することができる。ここで、まず、運動を次の式において考えることとする。

【0038】

【数4】

$$f(x, t) = f(M(x, t, t_r), t_r) = f(x_{tr}, t_r), \quad (4)$$

上式において、 x は (x_1, x_2) を示している。 M ※

$$g_1(x, t) = \int h_1(x - M^{-1}(x_{tr}, t, t_r)) f(x_{tr}, t_r) |J(M)|^{-1} dx_{tr}, \quad (6)$$

ここで、 M^{-1} は逆変換を表し、 $J(M)$ は M のヤコビアンを表し、 $| \cdot |$ は行列式作用素 (operator) を表している。式 (6) から、モデルの第1段は LSV オペレーションに変換されており、時間 t_r における高解像度画像に影響していることが明らかである。この事実を反映するために、次式 (7) が、センサ幾何の影響、光学ぼけ、及び相対運動をモデルする、合成 LSV ぼけ点拡がり関数 (PSF) を示すようにした。

【0041】

【数8】

$$h_1(x, x_{tr}, t, t_r) = h_1(x - M^{-1}(x_{tr}, t, t_r)) |J(M)|^{-1} \quad (7)$$

この式による影響が図8に示されている。図において、左の絵は、時間 t における画像処理を示したものであ

12

*能である。これは、第1の段60が空間的な線形シフト不変 (LSI) であり、第2の段62が時間的な LSI であるためである。

【0034】図7の第3の段64では、任意の空間-時間格子 Λ_s を用いて低解像度サンプリングをモデルする。この段の出力は、 $g_2(m_1, m_2, k)$ によって示されている。従来から、関数引き数 (function argument) として現れる整数値 m_1, m_2, k は次の式において解釈される。

10 【0035】

【数3】

※ (x, t, t_r) は、位置 x 及び時間 t における強度の位置を、時間 t_r におけるその位置に関連づけるマッピング変換である。この式は、運動軌道 (motion trajectories) に沿った強度維持を周知の推定方法で表したものである。 $h_1(x, h) = h_0(x, t) ** h$ 。 (x, t) とすることによって、モデリングの第1段の出力は、下式のように表すことができる。

【0039】

【数5】

$$g_1(x, t) = \int h_1(x - \chi) f(\chi, t) d\chi \quad (5)$$

変数

【数6】

$$x_{tr} = M(x, t, t_r)$$

を変化させ、式 (4) を用いることにより、式 (5) は以下ようになる。

30

【0040】

【数7】

る。ここでは、センサ素子のアパーチャ68は画像に組み付けられて (imposed) いる。右側の絵は、時間 t_r における同じ画像処理を示している。時間 t から t_r までに、アパーチャ68に供給されるマッピング変換は、画像70に供給されるマッピング変換の逆数である。式 (6) を、LSV 形式で書き直すと、

【数9】

$$g_1(x, t) = \int h_1(x; x_{tr}, t, t_r) f(x_{tr}, t_r) dx_{tr}, \quad (8)$$

のように表される。

【0042】ここで、第2モデリング段は、以下の式で表すことができる。

【0043】

【数10】

13

$$g_2(x, t) = \int_{t-T_0}^t h_1(x; x_{tr}; t, t_r) f(x_{tr}, t_r) dx_{tr} dt$$

14

(9)

積分の順序を変えることにより、上式は以下になる。

* 【0044】

* 【数11】

$$g_2(x, t) = \int h_2(x; x_{tr}; t, t_r) f(x_{tr}, t_r) dx_{tr} \quad (10)$$

ここで

$$h_2(x; x_{tr}; t, t_r) = \int_{t-T_0}^t h_1(x; x_{tr}; \tau, t_r) d\tau. \quad (11)$$

である。

※解像度画像の式で、以下のように書き表すことができる。

【0045】このように、モデリングの最初の2つの段が単一のLSVシステムに合成され、時間 t_r における連続する高解像度画像に作用する。これにより、観測された低解像度イメージを、時間 t_r における連続する高※

【0046】

【数12】

$$g(m_1, m_2, k) = \int h_2(m_1, m_2; x_{tr}; k, t_r) f(x_{tr}, t_r) dx_{tr} + v(m_1, m_2, k). \quad (12)$$

上式において、 h_2 (*) は有効LSVぼけPSFであり、整数引き数 (integer arguments) m_1, m_2, k は式(3)においてと同一の解釈を有する。

★ $2, t_r$) を離散化したものに関連づけることが望ましい。そこで、この型の離散的重ね合わせ推定 (discrete superposition summation) を、以下の式のように表すことにする。

【0047】離散化 (discretization)

式(12)におけるLSVぼけ関係を離散化し、観測された低解像度画像を、実際の高解像度画像 $f(x_1, x_2, t_r)$

【0048】

【数13】

$$g(m_1, m_2, k) = \sum_{(n_1, n_2)} f(n_1, n_2, t_r) h_{tr}(n_1, n_2; m_1, m_2, k) + v(m_1, m_2, k). \quad (13)$$

ここで、連続イメージ $f(x_1, x_2, t_r)$ は、2-D格子

☆の単位格子 (ユニットセル)

【数18】

【数14】

 Δ_{tr} U_{tr}

上に、高解像度センサによってサンプルされ、 $f(n_1, n_2, t_r)$ を形成する ((n_1, n_2) は

30 として用いることのできる物理的大きさを有していると仮定される。このように、焦点面の全体的な空間が、高解像度センサによって完全に覆われている。

【0050】

【数19】

 Δ_{tr} $U_{tr}(n_1, n_2)$

における点を特定する整数)、と仮定する。 t_r 及び

の項は、 n_1, n_2 によって特定された位置にシフトしたユニットセル(3)を示すものとして用いられている。このような定義により、さらに $f(x_1, x_2, t_r)$ は

【数20】

 $U_{tr}(n_1, n_2)$

を適当に選択することによって、 $f(n_1, n_2, t_r)$ のサンプリングを空間-時間格子上に形成することができる。

【0049】(単一の高解像度画素を発生させる (giving rise to) 個々の高解像度センサ素子は、格子

上ではほぼ一定であるという仮定に基づき、式(12)は以下のように表すことができる。

【0051】

【数21】

【数17】

 Δ_{tr}

☆

$$g(m_1, m_2, k) =$$

$$\sum_{(n_1, n_2)} f(n_1, n_2, t_r) \int \int_{U_{tr}(n_1, n_2)} h_2(m_1, m_2; x_{tr}; k, t_r) dx_{tr} + u(m_1, m_2, k). \quad (14)$$

式(13)と(14)を比較することにより、次のこと 50 が明らかである。

【0052】

【数22】

$$h_{tr}(n_1, n_2; m_1, m_2, k) = \int_{U_{tr}(n_1, n_2)} \int h_2(m_1, m_2; x_{tr}; k, t_r) dx_{tr}, \quad (15)$$

ここで、整数引き数 m_1 , m_2 , k , n_1 , n_2 は式 (3) においてと同様に解釈される。

【0053】図9には、離散LSV PSFの定式の1例が、矩形の高解像度格子

【数23】

 Λ_{tr}

上に示されている。図において、モーション（運動）が完全に移動であること、点 (m_1, m_2) 73を中心とした正方形の低解像度センサアパーチャ68が用いられていること、及び、光学的なぼけはないこと、が仮定とされている。 (x_1, x_2) 空間は、時間 t_r におけるセンサ焦点面である。図において、焦点面は、シフトされた高解像度サンプリングユニットセル

【数24】

 $U_{tr}(n_1, n_2)$

69によって覆われている。アパーチャ時間 T_a の間に、低解像度センサアパーチャ68によって「一掃」された焦点面の領域が、鎖線71によって示されている。式 (15) において特定された離散LSV PSFは、領域

【数25】

 $U_{tr}(n_1, n_2)$

69上に「存在した」(dwelled) 低解像度センサ68の所定面積をある時間の間計算し、同時にアパーチャ開放時間におけるその位置から、アパーチャ閉鎖時間における位置73まで移動させることによって形成される。なお、式 (15) に示されている結果は、センサアパー *

$$x_{tr} = M(x, t, t_r) = x + x_{bk} + v_k(t - (t_k - T_a)). \quad (16)$$

このとき、速度 v_1, k 及び v_2, k ($v_k = [v_1, v_2, k]^t$) は、アパーチャ時間 T_a にわたり一定であること、 $(t_k - T_a)$ はアパーチャの k 番目の開放の時間であること、

【数29】

 x_{bk}

はアパーチャの k 番目の開放における相対的初期位置を示していること、が仮定されている。

【0057】

【数30】

 x_{bk}

の量は、時間 t_k 及び t_r の関数である。光学的ぼけが※

$$h_2(x; t, t_r) = \frac{1}{T_a} \int_0^{T_a} h_a(x + x_{bk} + v_k \tau) d\tau \quad (17)$$

ここで、アパーチャ反応を、次式

*チャ68によって一掃された部分71と、高解像度サンプリング領域

【数26】

 $U_{tr}(n_1, n_2)$

69の間の単純重複領域を特定してない。

10 【0054】合成PSFの算出

式 (15) によって求められるぼけ関数

【数27】

 $h_{tr}(\cdot)$

を算出するための実際的な方法を説明する。このために、2つのケースを示す。第1のケースでは、移動式運動が仮定されている。第2のケースでは、一般的な画像運動が考慮されている。第2のケースを説明するために、まず一般的近似が与えられ、これにより、ぼけ計算方法が得られる。この計算方法は、第1の移動式運動のケースと同様に確立される。この近似に関し、アフィン変換及び射影変換の運動モデルの特定の方法が示される。

【0055】1) 移動式運動

移動式運動の場合において、アパーチャの k 番目の開放において有効な（すなわち、時間 t_k における k 番目の低解像度画像を獲得するための）区分的一定速度運動パス (piece wise constant velocity motion paths) を、次式のように定義する。

【0056】

【数28】

※ある時間無視され、PSF

【数31】

 $h_2(x, x_{tr}; t, t_r)$

がLSIであり、

【数32】

$$h_2(x - x_{tr}; t, t_r) = h_2(x; x_{tr}; t, t_r)$$

が定義され、式 (7) と式 (11) が適用されると、次式が得られる。

【0058】

【数33】

【数34】

$$h_2(x_1, x_2) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta M_1 \Delta M_2} \cdot \left(-\frac{\Delta M_1}{2} < x_1 < \frac{\Delta M_1}{2} \text{ and } -\frac{\Delta M_2}{2} < x_2 < \frac{\Delta M_2}{2} \right) \\ 0; & \text{else,} \end{cases} \quad (18)$$

によって与えられた2-D「矩形(rect)」関数であると仮定すると、 h'_2 は図10に示すような線図を用いて算出することができる。座標

【数35】

$$x + x_{bk}$$

は、時間 $\tau=0$ における、図10のライン78のスタート点76を設定する。積分はライン78を追従して $\tau = T_a$ における終点80に到達する。この結果は、アパーチャ68に交差する線分78の長さを表している。

【0059】ばけ h'_2 をさらに説明するために、

【数36】

$$v_{1,k} T_a > \Delta M_1 \text{ 及び } v_{2,k} T_a > \Delta M_2$$

である場合を考えるとする。この場合、点拡がり関数

【数37】

$$h'_2(x_1 - x_{1,bk}, x_2 - x_{2,bk}) =$$

$$K \left(\left(v_{2,k} \left(x_1 + \frac{\Delta M_1}{2} + v_{1,k} T_a \right) \right) - v_{1,k} \left(x_2 - \left(\frac{\Delta M_2}{2} - v_{2,k} T_a \right) \right) \right) \quad (19)$$

(領域2内のすべての (x_1, x_2) に対して)

このとき、 K は、離散PSF

【数40】

$$h_{ir}$$

を正規化することにより説明することのできるスケーリング定数である。

【0061】式(15)の離散PSF

【数41】

$$h_{ir}$$

は、図11に示される領域

【数42】

$$U_{ir}(n_1, n_2)$$

69の体積を積分することにより算出される。この領域

69の中心82は、

【数43】

$$x = x_s(m_1, m_2, k) + x_{bk} - x_{ir}(n_1, n_2)$$

に位置する。ここで、

【数44】

$$h_{ir}(n_1, n_2; m_1, m_2, k) = \sum_{n_1, n_2} h_{ok}^d(n_1, n_2)$$

ここで、

【数49】

$$h_{ok}^d(n_1, n_2)$$

は k 番目の低解像度画像の焦点ぼけを離散的に示したものであり、 n_1, n_2 は変数 (n_1, n_2) 上の2-D

*

$$h'_2(x - x_{bk})$$

(便宜上シフトが用いられている)を、図11に示すように、 (x_1, x_2) 面内で複数の領域に区分することができる。図に示されるこれら7つの領域のそれぞれにおいて、

【数38】

$$h'_2(x - x_{bk})$$

の値は x_1 および x_2 における一次方程式によって示されている。例えば、番号1をつけられた平行四辺形の領域では、 h'_2 の値は一定である。2番の台形領域においては、 h'_2 は次式を用いて求められる。

【0060】

【数39】

*

※

$$x_{ir}(n_1, n_2)$$

は

【数45】

$$x_s(m_1, m_2, k)$$

と同様に定義されている。このように、

【数46】

30

$$h_{ir}(x_1 - x_{1,bk}, x_2 - x_{2,bk})$$

は、領域69において、その位置が (m_1, m_2) 及び (n_1, n_2) によって決定されている

【数47】

$$h'_2(x_1 - x_{1,bk}, x_2 - x_{2,bk})$$

の体積を求めることによって算出される。

【0062】続いて、離散近似を用いて、次式の合成を実行することにより、光学的ぼけ $h_o(x, t)$ を考慮することができる。

【0063】

【数48】

$$(20)$$

※

D離散合成を示している。このようにして光学的ぼけを考慮に入れることにより、ぼけPSF

【数50】

$$h_{ir}$$

は、ほぼ $x_s(m_1, m_2, k)$ の領域内では、ほぼLSIであるとの仮定を立てる。画像が極度の非移動式運

19

動を行っていない限り、これは妥当な仮定であるといえる。光学的ぼけを、式(20)のように扱うのは好適である。これは、光学的ぼけが考慮されていないときには【数51】

$$h_{1r}$$

を簡単に計算することができ、さらに式(20)における合成を簡単に実施することができるからである。好適な実施においては、光学的ぼけPSFは、高解像度サンプリング格子によって表された、統一変数(unity variance)および5x5画素サポートを有するガウスと等しく設定される。

【0064】2) 一般的運動

$$h_2(x; x_r, t, t_r) = \int_{t-T_a}^t h_1(x - M^{-1}(x_r, \tau, t_r)) \left| J(M(x_r, \tau, t_r)) \right|^{-1} d\tau \quad (21)$$

同図は、積分時間の間に、 $t - T_a$ 84から t 86までの面

【数53】

$$x_{1r}$$

を通過して移動する際の、変換されたぼけ核 h_1 (.)を示している。そして、 h_2 (.)の値は、ヤコビアン及び h_1 (.)の振幅によって重みづけられた、【数54】

$$x_{1r}$$

上の「ドエル」時間となる。式(21)の計算は難しいが、これは式(21)の移動核 h_1 が積分期間の間連続的に変換しているためである。しかしながら、すでに指摘したように、アパーチャ時間におけるこの変換の非移動成分は小さいと想定されている。この影響については、図12において、

【数55】

$$h_1(M^{-1}(x_r, t, t_r))$$

※

$$\left| J(M(x, t - T_a, t_r), \tau, t_r) \right|^{-1} \int_{t-T_a}^t h_1(x(\tau) - M^{-1}(x_r, t - T_a, t_r)) d\tau \quad (22)$$

このとき

$$x(\tau) = \frac{T-\tau}{T} x + \frac{\tau}{T} M^{-1}(M(x, t - T_a + t, t_r), t - T_a, t_r) \quad (23)$$

であり、 T は2つの連続フレーム間の時間である。

【0067】この近似を用いて、空間的に均一で、時間的に区分的な一定速度移動運動の場合におけるぼけ算出にも同じ手順が用いられる。ただし、この場合には、各点 x において、ぼけは、図10に示されている矩形関数68に与えられた適当な変換によって算出される。要約すると、変換が、均一で一定の移動によって決定される場合には、近似は正確なぼけ算出となる。変換がアフィン変換である場合には、ヤコビアンは

【数59】

$$x_{1r}$$

20

*ぼけを計算するための上記方法は、例えばアフィン変換または射影変換によって説明されるようなより複雑な運動の場合にも発展させることができる。このような展開は、以下の概念に基づいている。すなわち、時間 t_r と t_k との間の運動による変換は重要であるかもしれないが、ぼけ形状に影響する変換の非移動成分はアパーチャ時間の間は小さいものである。このような概念が図12に例示されている。図12は、式(11)に示された計算を図で表したものであり、式(11)は次式のように書き直される。

【0065】

【数52】

※86上に重畳された(superimposed)関数

【数56】

$$h_1(M^{-1}(x_r, t - T_a, t_r))$$

84の鎖線によるアウトラインによって示されている。式(21)により、この近似は以下の3つを仮定する。

(1) ヤコビアン重み付けは一定である、(2) 変換【数57】

$$M(x_r, \tau - T_a, t_r)$$

はアパーチャ時間を通じて維持される(すなわち、この関数は、 τ が変化するときのみ移動する)、(3) 2つの連続するフレーム期間の移動パス、すなわちアパーチャ時間内の移動パスは線形である。この近似により、式(21)は次式のように書き換えられる。

【0066】

【数58】

40とともに変化しない。しかし、アパーチャが開放した状態で、ヤコビアンを一定時間にわたって一定になるように近づけた。さらに、この移動は、一定速度であると仮定されているが、これは必ずしもそうでなくともよい。射影運動の場合には、近似は、アフィン変換の場合を同じ効果を有し、ヤコビアンは h_1 (.)の空間ぼけサポートにわたって一定である、とのさらなる近似を有する。

【0068】C. 高解像度画像の再生

合成ぼけPSF

50 【数60】

21
 h_{tr}

、低解像度画像から基準画像までの運動ベクトル場推定、及び高解像度サンプリング格子が供給され、POCSの方法に基づく下記の技術を用いて高解像度画像が再生される。POCSでは、望ましい画像分布は、高解像度画像に対し、数学的ベクトル空間、例えばP次元のベクトル空間 N_1 画素 $\times N_2$ 行($P=N_1 \times N_2$)の要素であると仮定されている。POCS方法は、このベクトル空間内の、実際の高解像度画像を含む閉凸制約数集合(closed convex constraint sets)の定義を要する。これらの集合の数学的交わり(intersection)が実際の高解像度画像を含んでいる。これは、実際の高解像度画像がこれらの集合のそれぞれに含まれているからである。実際の高解像度画像の推定が、これらの制約数集合の交わりにおける1点として定義され、すでに周知のように、任意初期推定をこの制約数集合に連続的に射影す*

$$C_{tr}(m_1, m_2, k) = \left\{ y(n_1, n_2, t_r) : |r^{(y)}(m_1, m_2, k)| \leq \delta_0 \right\}, \quad (24)$$

ここで、次式

$$r^{(y)}(m_1, m_2, k) = g(m_1, m_2, k) - \sum_{n_1, n_2} y(n_1, n_2, t_r) h_{tr}(n_1, n_2; m_1, m_2, k), \quad (25)$$

は、制約数集合の、任意の要素yに関連する残差である。ここでは、これらの集合を、データ一定制約数集合(data consistency constraint sets)と呼ぶ。量 δ_0 は、実際の画像を集合

【数63】

$$C_{tr}(m_1, m_2, k)$$

の要素とする統計的信頼度を反映する先験境界(priori bound)である。 $r^{(f)}(m_1, m_2, k) = v(m_1, m_2, k)$ (fは実際の高解像度画像を示す)であるので、 $r^{(f)}(m_1, m_2, k)$ の統計は、 $v(m_1, m_2, k)$ の統計と同一である。このように、境界 δ_0 はノイズ処理の統計から決定され、実際の画像(すなわち、理想解)は、特定の統計的信頼度の範囲内にある集合の要素となる。例えば、ノイズが、標準偏差 σ を有するガウス分布を有する場合、 δ_0 は $c\sigma$ と等しく設定される。このとき、 $c\sigma$ は適当な統計的信頼境界によって決定されている(例えば、99%の信頼度に対して $c=3$ である)。

【0072】また、実際には、 δ_0 の値を直接調節することもできる。 δ_0 が増加するにつれ、再生された画像はシャープになるがノイズが多くなる。 δ_0 が減少すると、結果としての再生画像は、ノイズが小さくなるがより平滑になる。詳細な複数の実験により、 δ_0 を0.01と等しく設定した結果、POCS方法を、かなり急速に、十分に良質の画像に収束できた。

22

*ることによって決定される。

【0069】核制約数集合に関連して、射影作用素があり、これが前記空間内にあるが集合の外部である任意点を、集合内の最も近接する点にマップする。さらに、緩和された射影作用素 $T = (1 - \lambda)I + \lambda P$; $0 < \lambda < 2$ (Iは恒等作用素を示す)が定義されて、交差集合(intersection set)において推定を求めるのに用いることができる。

【0070】高解像度画像の再生における問題を直ちに解決する方法を開発するために、POCSの原理をいかに利用するかについて説明する。ここで、低解像度画像列 $g(m_1, m_2, k)$ の各画素に対し、以下に示す閉じた凸制約数集合を定義する。

【0071】

【数61】

【数62】

【0073】なお、集合

【数64】

$$C_{tr}(m_1, m_2, k)$$

は、低解像度画像のサンプルが有効である空間的位置に対してのみ定義できる。これにより、いかなる任意の低解像度サンプリング格子にも本発明を適用することができる。さらに、集合

【数65】

$$C_{tr}(m_1, m_2, k)$$

は、閉塞(occlusions)や覆われない領域のない低解像度画像のサンプルに対してのみ定義できる。後者の事実により、本発明は、所定のモーション画像内のシーンの変更に用いることができる。すなわち、制約数集合は、低解像度画像の適当なサンプルに対してのみ定義されている。

【0074】任意数 $x(n_1, n_2, t_r)$ の

【数66】

$$C_{tr}(m_1, m_2, k)$$

への射影 $z(n_1, n_2, t_r)$

【数67】

$$P_{tr}(m_1, m_2, k) \{x(n_1, n_2, t_r)\}$$

は、次式のように定義することができる。

【0075】

【数68】

$$P_{ir}(m_1, m_2, k)[x(n_1, n_2, i_r)] = \begin{cases} x(n_1, n_2, i_r) + \frac{(r^{(x)}(m_1, m_2, k) - \delta_0) h_{ir}(n_1, n_2; m_1, m_2, k)}{\sum_{o_1} \sum_{o_2} h_{ir}^2(o_1, o_2; m_1, m_2, k)}, & r^{(x)}(m_1, m_2, k) > \delta_0 \\ x(n_1, n_2, i_r), & -\delta_0 \leq r^{(x)}(m_1, m_2, k) \leq \delta_0 \\ x(n_1, n_2, i_r) + \frac{(r^{(x)}(m_1, m_2, k) + \delta_0) h_{ir}(n_1, n_2; m_1, m_2, k)}{\sum_{o_1} \sum_{o_2} h_{ir}^2(o_1, o_2; m_1, m_2, k)}, & r^{(x)}(m_1, m_2, k) < -\delta_0 \end{cases} \quad (26)$$

有界エネルギー (bounded energy)、確実性 (positivity)、及び限定サポートなどの更なる制約数を用いて、
結果を改善させることができる。次式のような振幅制約 * 10

$$C_A = \{y(n_1, n_2, i_r) : \alpha \leq f(n_1, n_2, i_r) \leq \beta\}, \quad (27)$$

ここで、振幅境界は、 $a = 0$ 、 $b = 255$ である。振幅制約数集合 C_A への射影 P_A は次のように定義される。※

$$P_A[x(n_1, n_2, i_r)] = \begin{cases} 0, & x(n_1, n_2, i_r) < 0 \\ x(n_1, n_2, i_r), & 0 \leq x(n_1, n_2, i_r) \leq 255 \\ 255, & x(n_1, n_2, i_r) > 255 \end{cases} \quad (28)$$

上記の射影が与えられると、高解像度画像
【数 7 1】

$$f(n_1, n_2, i_r)$$

の推定

【数 7 2】

$$\hat{f}(n_1, n_2, i_r)$$

$$\hat{f}_{\ell+1}(n_1, n_2, i_r) = T_A \hat{f}_{\ell}(n_1, n_2, i_r) \quad \ell = 0, 1, 2, \dots \quad (29)$$

ここで、

【数 7 4】

$$\bar{T}$$

は、緩和された射影作用子のカスケード (縦続) を示し、集合

【数 7 5】

$$C_{ir}(m_1, m_2, k)$$

の族に射影するものである。高解像度サンプリング格子上に双線形に内挿されたいかなる低解像度画像も、初期推定

【数 7 6】

$$\hat{f}_0(n_1, n_2, i_r)$$

として用いることができる。視覚的な最良の画質を有する低解像度画像を初期化に選択することにより、反復数

【数 7 7】

$$e$$

に達する速度を早めることができる。この反復数
【数 7 8】

$$e$$

において、視覚的に満足できる高解像度画像が再生される。理論上では、推定がすべての制約数集合の交わり内に存在するまで、この反復は継続する。しかしながら、実際には、反復は、通常、画像品質の視覚的観察などの特定停止基準に従って、または、ある差分測定基準 (difference metric) (すなわち、ノルム L_2 を用いた

* 数集合が用いられる。

【0076】

【数 6 9】

※ 【0077】

【数 7 0】

★は、すべての低解像度画像 $g(m_1, m_2, k)$ から反復的に求められる。このとき、制約数集合は、次式のよう

20 うに定義することができる。

【0078】

【数 7 3】

【数 7 9】

$$\|\hat{f}_{\ell} - \hat{f}_{\ell-1}\|$$

30) によって測定された、連続する推定値間の変化が所定の閾値以下に下がったときに、停止する。

【0079】図 13 は上記の方法を図によって説明したものである。合成 LSV ぼけは、現在の高解像度画像 88 の推定値の領域 71、例えば

【数 8 0】

$$\hat{f}_{\ell}(\cdot)$$

を、低解像度画像 46、48、53 の 1 つにおける特定画素強度 $g(m_1, m_2, k)$ 90 に関連付ける。続いて、残差項 (residual term)

【数 8 1】

40

$$r(\hat{f}_{\ell})(m_1, m_2, k)$$

が形成される。残差項
【数 8 2】

$$r(\hat{f}_{\ell})(m_1, m_2, k)$$

は、(δ_0 によって決定されるある誤差境界内の) 現行の高解像度画像推定値から観測値が形成できたか否か、したがって、その高解像度画像推定値がデータ一定集合
【数 8 3】

$$25$$

$$C_{lr}(m_1, m_2, k)$$

に属するか否かを示すものである。高解像度画像推定値が前記集合内に存在しない場合（すなわち、残差が大きすぎる場合には）、射影作用子

【数 8 4】

$$P_{lr}(m_1, m_2, k)$$

はその残差を現行の高解像度画像 8 8 推定値（式

【数 8 5】

$$C_{lr}(m_1, m_2, k)$$

の加法的項 (additive term) 上に逆射影 (back project) し、集合

【数 8 6】

$$C_{lr}(m_1, m_2, k)$$

に属する高解像度画像の新たな推定値を形成するため、境界 δ の内の、観測値 $g(m_1, m_2, k)$ を発生させることができた。一定の制約数集合が定義されている低解像度画素 9 0 のそれぞれにこれらの射影を行うことにより、式 (2 9) に示された合成射影

【数 8 7】

$$\tilde{T}[\tilde{f}_l(n_1, n_2, t_r)]$$

を完成させることができる。続いて、振幅制約数集合へ射影することによって、POCS 方法の一反復を完成させ、次の推定値

【数 8 8】

$$\tilde{f}_{l+1}(\cdot)$$

を生成することができる。

【0080】以下に、POCS に基づいた再生方法の実施の 1 例を示す。

【0081】1. 基準画像、及び基準時間 t_r を選択する。

【0082】2. 高解像度格子を特定し、この高解像度格子と、運動推定の目的のために、双線形内挿によって画像値が生成されている低解像度矩形格子との密度の比を決定する。ここでは、この比を r とする。（例えば、図 2 及び図 6 に示されている例では、 $r=2$ である）

3. 運動推定を行う：各低解像度画像 $g(m_1, m_2, k)$ を低解像度矩形格子に、空間的双線形的に内挿する；内挿された低解像度画像のそれぞれから、時間 t_r における内挿された低解像度画像までの運動を推定する；推定運動ベクトルを r によって見積もる。

【0083】4. 運動パスが有効な各画素位置 (m_1, m_2, k) に対し、式 (2 4) に従って集合

【数 8 9】

$$C_{lr}(m_1, m_2, k)$$

26

を定義する。

【0084】5. 集合

【数 9 0】

$$C_{lr}(m_1, m_2, k)$$

が定義された各位置 (m_1, m_2, k) に対して、合成ぼけ PSF

【数 9 1】

$$h_{lr}(n_1, n_2; m_1, m_2, k)$$

を算出する。

【0085】6. 高解像度画像のサンプリング格子上に低解像度画像を双線形的に内挿した後、視覚的に最良品質を有する低解像度画像に等しい

【数 9 2】

$$\tilde{f}_0(n_1, n_2, t_r)$$

を設定する。

【0086】7. 集合

【数 9 3】

$$C_{lr}(m_1, m_2, k)$$

が定義されているすべての位置 (m_1, m_2, k) に対し、式 (2 5) に従って残差

【数 9 4】

$$r(\tilde{f}_l)_{(m_1, m_2, k)}$$

を算出する；式 (2 6) の射影

【数 9 5】

$$P_{lr}(m_1, m_2, k)$$

を用いて残差

【数 9 6】

$$r(\tilde{f}_l)_{(m_1, m_2, k)}$$

を逆射影 (back-project) する。

【0087】8. 式 (2 8) を用いて増幅射影 P_A を行う。

【0088】9. 停止基準が満たされれば、停止する。満たされなければ、ステップ 7 に戻る。

【0089】停止基準が満たされれば、画像を表示することも、将来の表示に備えて記憶することも、あるいは遠隔表示のために送信することもできる。

【0090】好適な 1 実施形態に関し、本発明を説明してきたが、当業者であれば、本発明の範囲を逸脱することなく、本発明を変更及び修正することが可能である。

【0091】

【発明の効果】本発明によれば、入力画像が標準矩形格子上にサンプリングされていない場合でも、入力を標準矩形格子上で内挿処理するという前処理を行わなくとも、このような画像を処理することができる。本発明

は、凸集合への射影 (POCS) に基づく方法を用いて、ぼけ、ノイズ、任意の格子にサンプリングされた画像の問題を同時に扱う、画像再生方法を展開させている。さらに、本発明は、運動推定 (motion estimates) を柔軟に扱うことができる。また、本発明は、運動推定の正確性に適応することができる高解像度画像再生を可能にするものである。

【図面の簡単な説明】

【図 1】 本発明の主要なステップを示すブロック図である。

【図 2】 低解像度サンプリング格子、及び本発明による高解像度画像のサンプリング格子を示す図である。

【図 3】 本発明を実施する適当な装置を示した概略図である。

【図 4】 連続する低解像度画像、及びこれらの低解像度画像の 1 つにおける選択された対象領域を示す図である。

【図 5】 本発明によるマッピング変換を生成する方法を説明するために有用な図である。

【図 6】 本発明によるマッピング変換を生成する方法を説明するために有用な図である。

【図 7】 本発明による組み合わせられた PSF を計算するために用いられる画像フォーメーションモデルを示すブロック図である。

【図 8】 連続画面における低解像度画像の相対運動によるぼけ PSF の有効な変換を示す図である。

【図 9】 移動運動の場合の PSF を示すための図である。

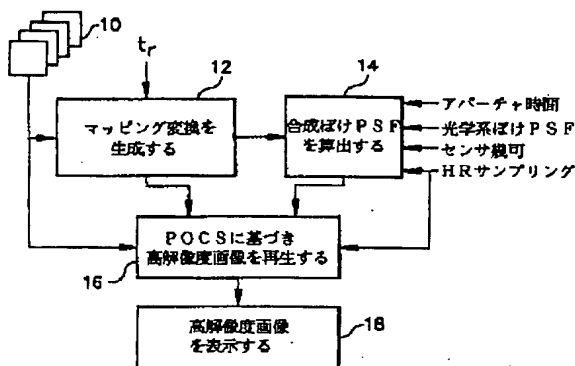
【図 10】 LSI ぼけ関数

【数 97】

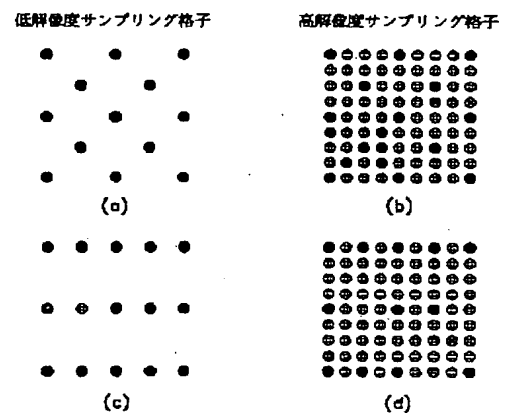
$$h_2(x_1, x_2, t, t_r)$$

を算出するための手順を示す図である。

【図 1】



【図 2】



【図 11】

【数 98】

$$h_2(x_1 - x_{1,bk}, x_2 - x_{2,bk})$$

の領域区分を示すための図である。

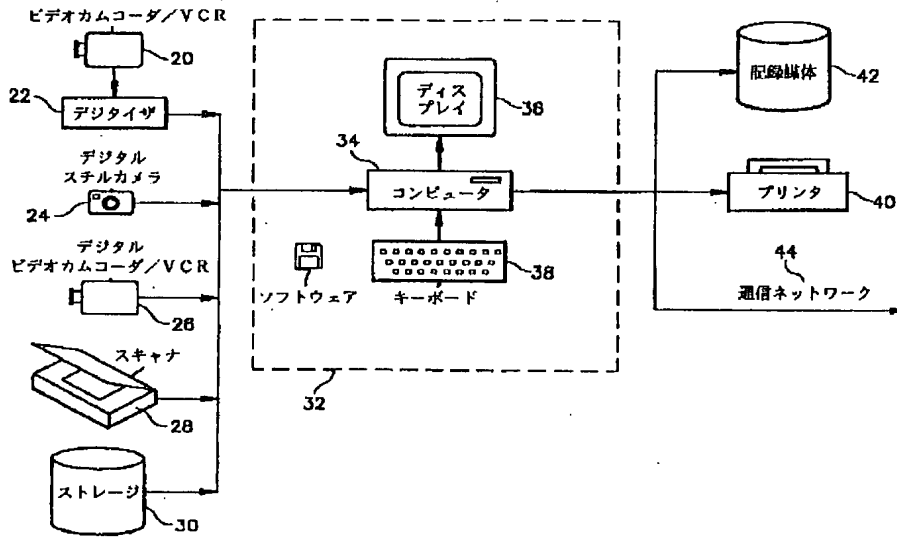
【図 12】 合成された有効ぼけ PSF を算出する際に、アフィン変換に関連する遠近運動モデル (perspective motion model) に用いられる近似を示すための図である。

【図 13】 POCS に基づく画像再生方法を説明するための図である。

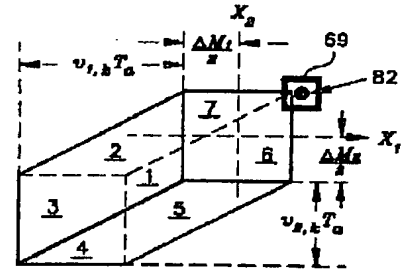
【符号の説明】

10 低解像度画像、12 マッピング変換供給ステップ、14 合成 PSF 算出ステップ、16 高解像度画像生成ステップ、18 高解像度画像表示ステップ、20 ビデオカムコーダ/VCR、22 デジタル化、24 デジタルスチルカメラ、26 デジタルビデオカムコーダ、28 デジタルスキャナ、30 ディスク記憶装置、32 画像処理コンピュータ装置、34 コンピュータ、36 CRT、38 キーボード、40 プリンタ、42 記憶媒体、44 通信ネットワーク、46、48、50 低解像度画像、52 対象領域、53 低解像度画像、54 ダイヤモンド型サンプリング格子、56 矩形サンプリング格子、60 光学系装置ぼけモデル、62 アパーチャ時間モデル、64 低解像度サンプリングモデル、66 付加ノイズモデル、68 センサアパーチャ、69 高解像度サンプリング領域、70 画像、71 センサアパーチャによって一掃された領域、73 センサアパーチャの中心、76 始点、78 ライン (線)、80 終点、82 領域の中心、84 変換されたぼけ核、86 変換されたぼけ核、88 高解像度画像、90 低解像度画像画素。

【図 3】

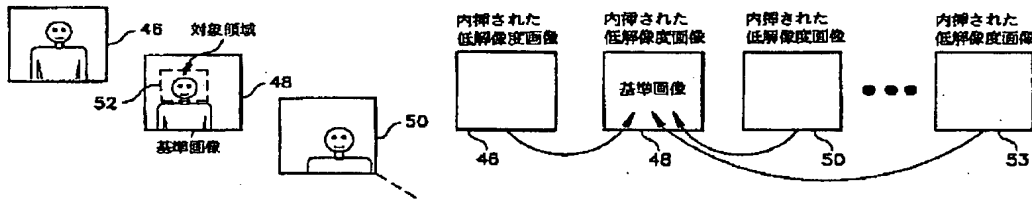


【図 11】

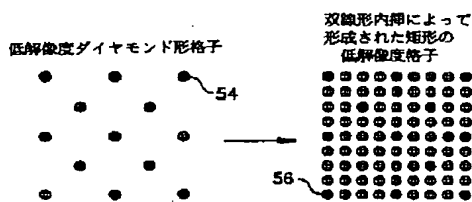


【図 4】

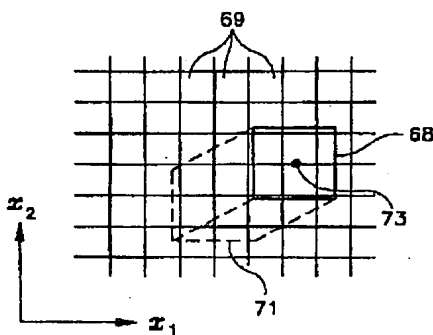
【図 5】



【図 6】



【図 9】



【図 7】

